

学校编码: 10384

学 号: 32020091152443

分类号____密级____

UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

高温结构安全评定相关技术研究
Related Technologies on Safety Assessment of High
Temperature Structures

李林波

指导教师姓名: 陈立杰 副教授

专 业 名 称: 航空宇航制造工程

论文提交日期: 2012 年 6 月

论文答辩时间: 2012 年 6 月

学位授予日期: 2012 年 6 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2012 年 6 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘 要

随着工业生产的技术要求越来越高, 高温设备构件需适应更恶劣的工作环境。研究高温材料的断裂力学行为以及完善设备构件的安全评定技术是结构完整性评估的重要内容, 对于许多工业部门, 如石油化工、能源电力、航空航天等具有十分重要的意义。本文就安全评估技术中的基本问题: 材料的高温断裂力学行为及数值模拟方法、高温结构免于蠕变失效分析的判定条件进行了研究。主要研究内容如下:

(1) 开展了 0Cr18Ni9 不锈钢在 550℃ 下的疲劳以及蠕变-疲劳裂纹扩展试验, 得出疲劳以及蠕变-疲劳裂纹扩展曲线, 分析了保载时间对蠕变-疲劳裂纹扩展速率的影响, 总结了相应的蠕变-疲劳裂纹扩展规律。研究发现, 在蠕变-疲劳交互作用下裂纹扩展速率大于同等试验条件无保载时间时的疲劳裂纹扩展速率。通过把蠕变-疲劳裂纹扩展方程中疲劳机制相关系数和蠕变机制相关系数与保载时间建立关联, 说明了随着保载时间的增加, 疲劳机制相关系数逐渐减小, 蠕变机制相关系数逐渐增大, 蠕变导致的损伤逐渐成为材料破坏的主导因素。

(2) 利用 ANSYS 软件进行了 0Cr18Ni9 不锈钢标准 CT 拉伸试样在 550℃ 下疲劳裂纹扩展的数值模拟, 讨论了裂纹闭合效应出现的原因和形式, 并在数值模拟中采用接触问题分析方法, 用以解决数值模拟中出现的负位移现象。结果表明, 数值模拟结果与试验结果较好的吻合且偏于保守。

(3) 以 R5 规程中描述蠕变-疲劳机制下的通用裂纹扩展模型为基础, 推导出了把蠕变机制与疲劳机制关联在一起的等效参量, 建立一个新的蠕变-疲劳裂纹扩展方程。结合我们对 0Cr18Ni9 不锈钢的测试数据, 验证了模型的有效性, 并与 R5 中模型的计算结果相比较, 本文模型预测结果更接近实验结果, 且大大简化了计算过程。

(4) 在分析已有设计规范及相关文献中的含缺陷结构免于蠕变失效分析的判定条件的基础上, 结合相关蠕变理论, 综合考虑蠕变变形量及服役时间两个条件, 建立了一种新的高温含缺陷结构免于蠕变失效评定的条件, 并结合一个工程案例进行分析验证, 结果表明本文建立的免于蠕变失效评定的准则具有一定的工程价

值。

关键词：安全评定 0Cr18Ni9 不锈钢 高温疲劳 数值模拟 蠕变-疲劳

厦门大学博士论文摘要库

Abstract

Nowadays, with the growing technical requirements of industrial production, high temperature components need to adapt to much worse servicing conditions. Studies on fracture mechanics behavior of materials at high temperatures and improvements of safety assessment techniques of components are important contents of the structural integrity assessment, and are of great significance for many industries, such as petroleum, chemical, electrical energy, aerospace, etc. In this thesis, some fundamental issues on safety assessment technologies, fracture mechanics behavior of materials at high temperatures, numerical simulation method of fracture behavior, and the criteria of high temperature structure free from assessment of creep failure. The main contents are as follows:

(1) The fatigue and creep-fatigue crack propagation tests are carried out for austenitic stainless steel 0Cr18Ni9 at 550°C and the crack growth curves are obtained. Then the effect of holding time of load on creep-fatigue crack growth rate are systematically analysed and the corresponding creep-fatigue crack propagation rules are given. It is found that the crack growth rates under creep-fatigue loading are greater than those under fatigue loading conditions at same temperature and stress levels. Through the connection between the holding time of load and the correlation coefficients of the fatigue mechanism and the creep mechanism, it shows that with the increase of the holding time of load, the correlation coefficient of fatigue mechanism is decreasing and the correlation coefficient of creep mechanism is increasing. Thus creep damage gradually becomes the dominant factor of materials' failure.

(2) By using ANSYS software, numerical simulation of crack propagation behaviors are performed for 0Cr18Ni9 stainless steel at 550°C under the fatigue loading. The reasons of crack close effect is discusses. With a contact problem analysis method, we solve the negative displacement phenomenon in numerical simulation. The simulation results show that there is a good agreement between the results of numerical simulations and experiments.

(3) Based on the general creep-fatigue crack propagation model in R5, an equivalent parameter is deduced to combine the fatigue mechanism and the creep mechanism and a new creep-fatigue crack propagation equation is established. Considering the test data of 0Cr18Ni9 stainless steel in this thesis, the validity of the

model is verified. Compared with the calculation result by using the models in R5, the prediction results of the present model are in good accordance with the experimental results and also the calculation process is greatly simplified.

(4) Based on the criteria of high temperature structure free from assessment of creep failure in the existing design codes and relevant literatures, combined with related creep theories, we establish a new criteria considering both the amount of creep deformation and the service time. Taking an engineering case as an example to verify the criteria, the computational results show that the criteria of high temperature structure free from assessment of creep failure in this thesis is suitable for engineering assessment.

Key word: Safety assessment; 0Cr18Ni9 stainless steel; High temperature fatigue; Numerical simulation; Creep-fatigue

目 录

| | |
|-------------------------------|-----|
| 中文摘要 | I |
| 英文摘要 | III |
| 第一章 绪论 | 1 |
| 1.1 研究背景及意义 | 1 |
| 1.2 国内外研究现状 | 2 |
| 1.2.1 疲劳裂纹扩展的数值模拟 | 2 |
| 1.2.1.1 数值计算方法 | 2 |
| 1.2.1.2 裂纹扩展数值模拟研究 | 3 |
| 1.2.2 高温结构免于蠕变失效评定的判定准则 | 3 |
| 1.2.3 蠕变-疲劳扩展规律 | 5 |
| 1.2.3.1 裂纹扩展方程 | 5 |
| 1.2.3.2 影响因素 | 7 |
| 1.3 本文的主要研究内容 | 9 |
| 第二章 高温疲劳及蠕变-疲劳裂纹扩展试验研究 | 10 |
| 2.1 高温疲劳试验研究 | 10 |
| 2.1.1 试样与试验方法 | 10 |
| 2.1.2 试验结果及分析 | 12 |
| 2.2 高温蠕变-疲劳试验研究 | 13 |
| 2.2.1 试样与试验方法 | 13 |
| 2.2.2 试验结果及分析 | 14 |
| 2.3 本章小结 | 21 |
| 第三章 高温环境下疲劳裂纹扩展的数值模拟 | 22 |
| 3.1 数值模拟相关理论 | 22 |
| 3.1.1 裂纹生成方法 | 22 |
| 3.1.2 裂纹扩展判定准则 | 23 |
| 3.1.3 裂纹闭合理论 | 24 |
| 3.2 疲劳裂纹数值模拟 | 26 |
| 3.2.1 技术路线 | 26 |

| | |
|---------------------------------|----|
| 3.2.2 有限元模型及其特点 | 27 |
| 3.2.3 计算能量释放率G | 29 |
| 3.2.4 数值模拟结果及其分析 | 30 |
| 3.3 本章小结 | 32 |
| 第四章 蠕变-疲劳裂纹扩展规律 | 33 |
| 4.1 蠕变-疲劳裂纹扩展公式的改进 | 33 |
| 4.2 蠕变-疲劳裂纹扩展公式的推导和验证 | 35 |
| 4.3 本章小结 | 41 |
| 第五章 高温结构免于蠕变失效评定的判定准则研究 | 42 |
| 5.1 蠕变理论基础 | 42 |
| 5.1.1 应变强化理论 | 44 |
| 5.1.2 时间硬化理论 | 44 |
| 5.1.3 稳态(最小)蠕变速率与蠕变断裂时间关系 | 46 |
| 5.2 免于蠕变失效分析的判定条件的建立 | 47 |
| 5.3 计算实例 | 51 |
| 5.3.1 计算过程 | 51 |
| 5.3.2 判定是否需要进行蠕变失效评定及结果 | 53 |
| 5.4 本章小结 | 54 |
| 第六章 总结与展望 | 55 |
| 参 考 文 献 | 57 |
| 致 谢 | 62 |
| 攻读硕士学位期间发表的论文 | 63 |

Table of Contents

| | |
|--|-----|
| Chinese Abstract | I |
| English Abstract | III |
| Chapter 1 Introduction | 1 |
| 1.1 Research background and value | 1 |
| 1.2 Research status at home and abroad | 2 |
| 1.2.1 Numerical simulation of fatigue crack growth | 2 |
| 1.2.1.1 Numerical simulation method | 2 |
| 1.2.1.2 Crack propagation numerical simulation | 3 |
| 1.2.2 The criteria of high temperature structure free from assessment of creep failure | 3 |
| 1.2.3 The creep-fatigue crack propagation rules | 5 |
| 1.2.3.1 Crack propagation equation | 5 |
| 1.2.3.2 Influencing Factor | 7 |
| 1.3 The Research Content | 9 |
| Chapter 2 Fatigue and creep-fatigue crack propagation tests at high temperature | 10 |
| 2.1 Fatigue crack propagation tests at high temperature | 10 |
| 2.1.1 Sample and test method | 10 |
| 2.1.2 Test results and analyses | 12 |
| 2.2 Creep-fatigue crack propagation tests at high temperature | 13 |
| 2.2.1 Sample and test method | 13 |
| 2.2.2 Test results and analyses | 14 |
| 2.3 Chapter Summary | 21 |
| Chapter 3 Numerical simulation of fatigue crack growth under high temperature | 22 |
| 3.1 Related numerical simulation theories | 22 |
| 3.1.1 Crack generation method | 22 |
| 3.1.2 Crack propagation criteria | 23 |
| 3.1.3 Crack closure theory | 24 |
| 3.2 Fatigue crack numerical simulation | 26 |
| 3.2.1 Technical route | 26 |

| | |
|--|----|
| 3.2.2 The finite element model and its characteristics | 27 |
| 3.2.3 Energy release rate G | 29 |
| 3.2.4 Numerical simulation results and analyses..... | 30 |
| 3.3 Chapter Summary | 32 |
| Chapter 4 Creep-fatigue crack propagation rule | 33 |
| 4.1 The improvement of creep-fatigue crack propagation formula | 33 |
| 4.2 Deduction and validation of creep-fatigue crack propagation formula | 35 |
| 4.3 Chapter Summary | 41 |
| Chapter 5 The study of the criteria of high temperature structure free from assessment of creep failure | 42 |
| 5.1 Creep theory basis..... | 42 |
| 5.1.1 Strain strengthening theory | 44 |
| 5.1.2 Time harding law | 44 |
| 5.1.3 Steady state(minimum)creep rate and creep speed fracture time relationship | 46 |
| 5.2 New free from creep failure analysis of the establishment of the decision condition..... | 47 |
| 5.3 Computational Example..... | 51 |
| 5.3.1 Computational process..... | 51 |
| 5.3.2 Determinination of the need of creep failure analysis and results..... | 53 |
| 5.4 Chapter Summary..... | 54 |
| Chapter 6 Summary and Outlook | 55 |
| References | 57 |
| Acknowledgements | 62 |
| Published Paper | 63 |

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

受制于当前的制造水平和生产工艺条件,工程设备构件的初始状态就不可避免的夹杂一些缺陷。在高温环境下长期服役的设备构件,由于在疲劳、蠕变及其交互作用下,这些缺陷很容易生长成裂纹并扩展导致构件失效,甚至威胁到人们的生命财产安全。

在 1955-1999 年间,国外有近 30 根汽轮机转子发生断裂事故^[1];在 2004 年 4 月 16 日,重庆天原化工总厂 2 号氯冷凝器发生爆炸,造成 9 人死亡,周边大量居民迁移。在当前工业中使用的大型高温设备都具有潜在性的爆炸危险,如汽轮机、核反应器、焦炭塔、加氢反应器等,广泛分布于石油、化工、电力、核能、航空航天等行业。我国现至少有固定式压力容器 135.3 万台、移动式压力容器 9819 万只、压力管道总长度约 1000 多万公里^[2]。随着经济发展的需求,将会有更多的高温设备投入使用,一旦发生事故,将会导致社会生产遭受严重破坏,人民生命财产蒙受巨大损失。

导致高温设备构件失效的原因,往往是微观的、不可察觉的,失效形式也繁杂多样,在设计时难以控制,高温环境下,材料的性能易受影响,大多数表现为抗破坏损伤能力下降,蠕变、疲劳、材料锐化、变形等再加上环境因素的综合作用,大大提高设备构件的失效概率。

众所周知,实验测定材料的性能要消耗大量的人力、物力、财力,并且试验结果容易受人为因素和环境因素的影响,理论研究和数值模拟可大大减少这个过程的消耗以及缩短时间,结合实验结果,研究材料的性能及其变化规律有着事半功倍的效果。高温设备构件在设计之初,人们往往比较关心其强度、寿命、经济性等,但在实际工作运行中,设备构件的安全性和寿命周期往往低于之前建立在周密分析和实验验证基础上的期望,这导致了多起事故的发生却难以找到根源,大量的事实告诉我们,设备构件的安全性能和寿命周期依赖于工作环境。由于历史或技术水平等原因,现役的大多数高温设备构件都存在质量低劣、缺陷严重、超期服役等隐患,随时可能给国民经济带来严重损害以及对周边群众带来生命危

险。

但什么条件下需考虑设备构件的失效因素,首先应该有一个合乎工程实践的技术评定标准。当今国外发达国家对含缺陷的高温结构均有了完整性的评定规范,如英国的 R5 和 BS7910、法国的 RCC-MR 规程附录 A16、日本的 JNC 方法等,我国在管道权限的安全评定技术还不成熟,但在最近几年也有了长足的进步,研究成果显著。在实际运行的含有缺陷裂纹的设备构件中,以单纯的蠕变机制或疲劳机制去解释失效事故已经很勉强了,研究表明蠕变-疲劳交互作用下的裂纹扩展更为迅速,大大减少了工程设备的安全性和寿命周期^[3,4,5]。理想状态下不存在缺陷的设备构件是不可能存在的,所以允许一定的缺陷裂纹存在,并限制缺陷裂纹的扩展速度和长度,又能保证设备的正常运行,保证产品得到最大限度的使用才是工业产品设计的主体思想。

随着经济发展和人们日常生活水平的提高,对工业产品质量、日常生活保障设施功能、能源需求以及大型机械设备的要求也越来越高。理论研究和数值模拟保证了设备构件的设计实现周期短、质量好、耗费低,安全评定技术规范保证了工程设备在运行中的安全性,同时实现最大利益化的使用周期。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 疲劳裂纹扩展的数值模拟

1.2.1.1 数值计算方法

20 世纪 60 年代初出现的有限元法集结了计算模型、离散方法、数值求解和程序设计方法的统一^[6],从最初的用于复杂结构的求解和固体力学的计算分析不断向其他领域扩展,也成为分析断裂力学问题的首选数值方法。随着计算机科学的迅速发展,诞生了很多有限元分析软件,比如 ANSYS、ABAQUS、MARC、FRANC2D/L 等,给工程研究人员提供了性能好、实用价值高的工程分析工具。

随之发展起来的边界元法^[7,8,9,10],是在有限元法的基础上,应用 Gauss 定理使问题降阶,减少了处理空间维数和简化了输入数据,从而大大缩短计算时间以及减少了计算工作量,但是计算方法的简便性也限制了它在非线性问题求解上的应用。

近几年,受到工程界的广泛关注的无网格法^[11,12,13],无须将节点连成单元和

划分网格,只需要计算域的几何边界点及计算点,因此既有边界元法简便的优点,又继承了有限元法求解复杂结构问题的能力,使其比边界元法具有更广泛的应用范围。

石根华博士结合传统有限元法中插值函数构造方法与非连续变形分析中块体运动学理论两方面的优势^[14,15],提出了数值流形方法。可以自然地处理连续与非连续问题,并且适合于任意复杂边界条件,同时可以直接运用局部解析解,是经典解析分析方法与现代数值计算方法的有机结合。这种数值计算方法目前已成为计算力学中的一个研究热点。

另外,小波数值方法作为一种较新的数学方法^[16],已用于奇异性探测、微分方程数值解等,目前用于断裂力学问题研究的还处于初始阶段,这方面的研究工作还有待于进一步深入。

1.2.1.2 裂纹扩展数值模拟研究

屠立群^[17]做了基于 ANSYS 的 16MnR 钢的疲劳裂纹扩展分析,他利用弹塑性模型分析疲劳裂纹尖端的应力应变场,计算疲劳损伤和预测疲劳裂纹扩展速率。冒小萍^[18]用有限元分析软件 ANSYS 对静载荷条件下的 3PBS 试件的裂纹扩展进行数值模拟和用 FRANC3D/L 软件对几种典型的 3PBS 试件进行裂纹扩展过程的数值模拟分析,研究几何对称性和支撑对称性对裂纹扩展路径的影响,并分析比较了几种试件的数值模拟结果。

李亚智^[19]利用有限元法模拟含中心裂纹试件在等幅循环拉伸应力作用下的疲劳裂纹扩展过程,对塑性变形导致的裂纹闭合效应进行了分析。李学峰^[20]应用有限元分析软件 ABAQUS 模拟了 2024-T351 铝合金的疲劳裂纹扩展过程,对塑性变形导致的裂纹闭合效应进行了分析。李强^[21]应用有限元分析软件 ABAQUS 对压缩作用下的张开型裂纹的闭合过程进行了数值模拟,并提出了裂纹闭合载荷的简化求解公式。R.Rahgozar 和 H.Saffari^[22]研究了奇异网格下的裂纹尖端塑性变形造成的裂纹闭合现象。McClung^[23]用有限元研究了平面应力和平面应变下裂纹闭合效应。

Solanki^[24,25]对研究疲劳裂纹扩展中闭合效应的数值模拟方法进行了总结。

1.2.2 高温结构免于蠕变失效评定的判定准则

对产生多大的蠕变变形量会使高温结构失效的规定是各国关于高温结构的

设计和在役检验规范中不可缺少的部分，美国 ASME N47-29^[26]则按照分类不同准则实现应变限制，要求在设计寿命内，沿壁厚的平均累积非弹性应变不超过 1%，沿壁厚线性分布应变的最大值限制为 2%，局部累积非线性应变不超过 5%。

我国火力发电厂金属技术监督规程（DL438-2000）^[27]规定 12CrMo、15CrMo 和 12CrMoV 等材料的主蒸汽管道在运行 $2 \times 10^5 \text{h}$ 后，如果最大实测蠕变变形量小于 0.75%，则还可以继续运行 $3 \times 10^5 \text{h}$ ，如最大实测蠕变变形量达到 1%，则应进行材质鉴定。

通过对产生蠕变的主要因素加以限制也是安全评定的主流思想，英国 R5《结构高温响应的评定规程》^[28]通过两个规定时间来控制蠕变的影响：一、恒应变在初始应力下为 $1.25 \sigma_{0.2}^T$ （ $\sigma_{0.2}^T$ 为屈服强度）时产生 20% 的应力松弛量；二、在 $1.25 \sigma_{0.2}^T$ 的恒应力下累积蠕变应变达到 0.03% 所需要的时间。任何温度下的服役时间小于上述两个规定时间，则蠕变的影响可以忽略。

BS7910《焊接结构可接受缺陷评定方法》^[29]把操作期间内对应于屈服强度下产生 0.2% 累积蠕变应变的温度以及规定寿命值为恒定温度和屈服压力下达到 0.2% 累积蠕变应变所需的时间作为控制标准。英国 BS5500《非直接火烧焊接容器设计规范》^[30]则以表格形式给出了设计时需要考虑材料的蠕变性能的温度值。

国内的诸多专家学者也进行了对高温构件的评定研究，轩福贞、涂善东等^[31]沿承 R5 规范的设计思想，以参考应力为基础，定义了特征温度和特征服役时间两个概念，并规定对蠕变延性 ε_f 大于 10% 的材料以产生 0.2% 累积蠕变应变为界限，而蠕变延性 ε_f 小于 10% 的材料以产生 $\varepsilon_f / 50$ 累积蠕变应变为界限。

针对含缺陷结构的弹塑性失效和疲劳问题，2005 年初我国颁布了第一步缺陷评定标准——《在役含缺陷压力容器安全评定》。对于高温蠕变机制下的结构失效和缺陷评定，经过长期的研究积累和国家计划支持，已初步形成缺陷评定方法体系和技术框架。参照 R5 和 BS7910 的规程，轩福贞、涂善东等^[32]提出了高温结构免于蠕变失效评定条件，建立了与时间相关的失效评定图（TDFAD），并以此为基础，根据不同设备需要保证安全程度的不同，建立了适合工程应用的“三级评定”技术框架，将高温缺陷评定方法分为三个级别：简化评定、常规评定、高级评定。但这些理论依然不够成熟，使用面不广，TDFAD 方法仅适用单纯的蠕变机制。

1.2.3 蠕变-疲劳扩展规律

1.2.3.1 裂纹扩展方程

由纯蠕变机制或纯疲劳载荷引起的裂纹扩展规律和剩余寿命预测方法已经相对成熟，早期高温设备的寿命评定一般只考虑疲劳载荷或蠕变损伤的影响，高温环境下每个周期载荷内的裂纹扩展量可由疲劳引起的裂纹扩展和蠕变引起的裂纹扩展线性累积得到，但随后更多的试验结果表明，蠕变-疲劳交互作用下的材料寿命远低于单一机制下的试验结果，用线性累积法则计算的寿命有时甚至比实际寿命高出 10 倍^[33]，这种偏差主要是一定情况下的蠕变-疲劳之间发生了交互作用，导致实际寿命降低。

Kino 等^[34]进行了控制位移条件下 2.25Cr-1Mo 钢的蠕变-疲劳裂纹扩展试验，认为循环载荷下的疲劳裂纹扩展和保载时间内的蠕变裂纹扩展两种机制竞争并存，而裂纹扩展则由主控机制决定的。Pacheco 研究指出^[35]，分别采用疲劳和蠕变试验结果都不能准确评价蠕变-疲劳状况下结构的完整性和剩余寿命，因而试验测定蠕变-疲劳条件下的材料性能和规律不可避免。

自 20 世纪 80 年代后期，对蠕变-疲劳裂纹扩展的研究逐步引起重视。Saxena^[36]提出了一个 3 项裂纹扩展模型以考虑这两种机制的影响：

$$\frac{da}{dN} = C_0(\Delta K)^{n_0} + C_1 f(K_h, t_h) + C_2 \int_{t_{inc}}^{t_h} \left(\frac{da}{dt} \right) dt \quad (1.1)$$

式中第 1 项代表了单纯疲劳载荷的贡献，第 2 项表征了蠕变-疲劳的交互作用，第 3 项是单纯蠕变机制引起的裂纹扩展。但是这个模型中，蠕变裂纹孕育时间 t_{inc} 和界定蠕变因素的温度采用的是特定试验条件下的结果，显然不适合推广到其它情况，还有第 2 项和第 3 项都包含了保载时间的影响，过多考虑了蠕变因素的作用，导致裂纹扩展预测值偏大。

为弥补上述不足，Saxena 和 Gieseke^[37]提出了 3 项模型的修正式

$$\frac{da}{dN} = \left(\frac{da}{dN} \right)_{cycle} + \left(\frac{da}{dN} \right)_{time} \quad (1.2)$$

式中第一项 $(da/dN)_{cycle} = C_0(\Delta K)^{n_0}$ ，表示循环相关的裂纹扩展速率；第 2 项为 $(da/dN)_{time} = B(C_t)_{avg}^q t_h$ ，表示保载时间内的平均裂纹扩展速率。上式中，蠕变参量

$(C_t)_{avg}$ 考虑了疲劳因素的影响，所以尽管表现为线性累积形式，也能给出与实验结果相符合的预测值。但是在第一项表征循环相关的裂纹扩展速率中，并未考

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库